

# Virtual Engineering: Informations-, Simulations- und Kooperationsmodelle für den ingenieurgerechten Entwurfsprozess

Rank, Ernst  
Borrmann, André  
Wenisch, Petra

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 2007 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.129-139



J. Cramer Verlag, Braunschweig

## **Virtual Engineering: Informations-, Simulations- und Kooperationsmodelle für den ingenieurgerechten Entwurfsprozess \***

ERNST RANK, ANDRÉ BORRMANN UND PETRA WENISCH

Lehrstuhl für Computation in Engineering – Bauinformatik  
Technische Universität München, Arcisstraße 21, D- 80290 München, Germany  
E-mail: rank@bv.tum.de

Entwurfsprozesse in den Ingenieurwissenschaften finden in aller Regel nicht linear sondern in rückgekoppelten Zyklen stattfinden. Dabei spielt *Kommunikation und Kooperation* eine entscheidende Rolle, zumal der Entwurf komplexer technischer Produkte nahezu immer in multidisziplinären Teams zu erfolgen hat. Neuere Entwicklungen im Bereich der Produkt- und Prozessmodelle sowie der Anbindung von Höchstleistungscomputern ermöglichen es heute, selbst für komplexe Simulationsaufgaben eine direkte Interaktion des Ingenieurs mit dem Modell sogar während der Berechnung zu erlauben und auf diese Weise diesen Rückkopplungsprozess deutlich zu beschleunigen. Noch einen Schritt weiter gehen so genannten *Computational Steering* Systeme, welche die Zusammenarbeit von Ingenieurteams über schnelle Computernetze durch gemeinsame ‚virtuelle Projekträume‘ unterstützen. Der Aufsatz gibt einen Überblick über neuere Entwicklungen von computergestützten Informations-, Simulations- und Kooperationsmodellen im Bau- und Umweltingenieurwesen und zeigt Beispiele zu einer netzgestützten Simulation der Luftströmung in Innenräumen.

### **1. Einleitung**

Der Bauingenieur Konrad Zuse (ALEX, 2000) war in den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts neben John von Neumann (MACRAE, 1994) der entschei-

---

\* Der Vortrag wurde am 04.05.2007 beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

dende Wegbereiter für die Entwicklung elektronischer Rechenanlagen. 1941 stellte er den ersten funktionsfähigen programmgesteuerten Rechenautomaten Z3 fertig. Seine wissenschaftlichen Wurzeln im Bauingenieurwesen sind sicherlich kein Zufall. Kaum eine andere Ingenieursdisziplin ist historisch so eng mit einer zuverlässigen Modellierung physikalischer Phänomene und mit daraus abgeleiteten komplexen Berechnungsverfahren verbunden wie die (Bau-) Mechanik. So gehörten strukturmechanische Berechnungsmethoden zu den ersten Anwendungsfeldern der Computertechnologie. Bauingenieure haben die neuen Möglichkeiten elektronischer Rechenanlagen nicht nur sehr schnell genutzt sondern auch selbst entscheidende Impulse zur Entwicklung von numerischen Simulationsverfahren gegeben. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Methode der finiten Elemente (ZIENKIEWICZ & TAYLOR, 2000; WRIGGERS, 2001), die heute einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht hat und nicht nur in weiten Bereichen des Bauingenieurwesens erfolgreich eingesetzt wird (MANG, 1995, MANG et al., 2003a,b; WRIGGERS, 1998, DÜSTER et al., 2001; RANK et al., 2005). Ohne dieses Verfahren wären heute viele moderne Entwicklungen weder im Automobilbau noch in der Luft- und Raumfahrttechnik oder der Medizintechnik (RIFAI et al., 1999; BAZILEVS et al., 2006) möglich. Gegenwärtig werden diese Verfahren auch unter Einsatz von Hochleistungsrechnern mit dem Ziel fortentwickelt, komplexe physikalische Vorgänge und deren Wechselwirkungen für natürliche Systeme auf vielen Zeit- und Raumskalen zu simulieren (LACKNER et al., 2004; ZOHDI & WRIGGERS, 2005). Aber auch nichtnumerische computergestützte Verfahren spielten und spielen im Bauingenieurwesen eine zentrale Rolle. Erwähnt seinen CAD-Methoden (MEIßNER et al., 1992; RÜPPEL & MEIßNER, 1996), die in den siebziger Jahre frühe Anwendungen im Bauwesen gefunden hatten und ihrerseits die Entwicklung grafischer Kernsysteme und der dazu geeigneten Hardware beeinflussten. Auch internet-gestützte Kommunikation auf der Basis technischer Fachsysteme wurde bereits in den achtziger und frühen neunziger Jahren in weltweit operierenden Bauunternehmungen (BEUCKE et al., 1990) erfolgreich eingesetzt.

Heute zeichnen sich neue Möglichkeiten des IT-Einsatzes im Bau- und Umweltingenieurwesen ab. Die Einführung von (Bauwerks)-Produktmodellen erlaubt eine ganzheitliche Sicht auf geometrische, sächliche und organisatorische Aspekte eines Bauwerks und ist damit eine Voraussetzung für ein Datenmodell, das grundsätzlich den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks begleiten und unterstützen kann. Es stellt den Ausgangspunkt dar, der in vielen Phasen von Bauwerksplanung, Erstellung und Betrieb als Informationsbasis für Simulationsaufgaben unterschiedlichster Art genutzt werden kann. Immer leistungsfähigere Hardware erlaubt es, dafür notwendige numerische Verfahren in interaktive Systeme einzubetten, die es dem Benutzer besser als bisher erlauben, sehr schnell und intuitiv technisch-wissenschaftliche „Wenn-Dann“-Analysen durchzuführen und dadurch zu optimierten Lösungen zu kommen. Eine Einbettung in internet-gestützte, virtuelle Projekträume stellt schließ-

lich die Brücke zu Kooperationsmethoden dar, die in global verteilten Projektteams eine wachsende Rolle spielen, deren Potential heute aber noch kaum abzuschätzen ist.

## 2. IT-gestützte Kooperation und Kommunikation

Im Bereich so genannter *Office-Anwendungen* hat IT-gestützte Kooperation und Kommunikation in den letzten zehn Jahren einen hohen Stand der Technik erreicht. So ist es heute möglich, nahezu ortsunabhängig mit den verschiedensten Endgeräten unterschiedliche Medien (Text, Bild, Video, Ton) zu nutzen, auf *gemeinsame* Datenbestände zuzugreifen und diese interaktiv zu verändern. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen synchroner (z.B. Telefon, Video-konferenzen) und asynchroner Kommunikation (Email, „Wikis“, siehe z.B. [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)). Rechnergestützte Kooperation nutzt Kommunikation, um in einem Team einen gemeinsamen Planungsgegenstand zu bearbeiten und ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Es ist dabei von entscheidender Bedeutung, dass der gemeinsame Datenbestand, selbst wenn er nicht zentral an einem Ort vorliegt, sondern im Netz verteilt ist, konsistent und in der für die jeweils eigene Teilaufgabe notwendigen Sicht für jeden Kooperationspartner verfügbar ist. Wichtige Entwicklungen, die diese Kooperation und Kommunikation unterstützen sind so genannte *Collaboration Platforms* (z.B. Microsoft Sharepoint, Lotus Collaboration Platform, Oracle Collaboration Suite), die heute in zahlreichen kommerziellen und nicht-kommerziellen Software-Varianten verfügbar sind.

Wesentlich schwieriger als bei vergleichsweise simplen Office-Anwendungen ist die Unterstützung rechnergestützter Kooperation für Berechnungs- und Planungsprozesse in den Ingenieurwissenschaften. Dies folgt bereits aus der Softwarestruktur von Simulationsverfahren z.B. in der Struktur- oder Fluidmechanik, die in aller Regel zwischen drei Bearbeitungsstufen unterscheidet (siehe Abb. 1): Im *Preprocessing* wird ein i.a. geometrisches Modell der zu untersuchenden Struktur meist interaktiv erstellt und die für die Berechnung notwendigen physikalischen Daten definiert. Dazu gehören Materialparameter,

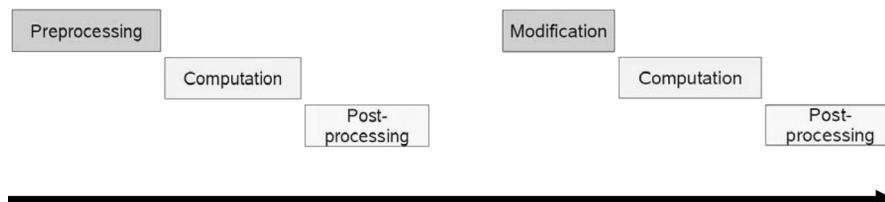


Abb. 1: Drei Phasen der Numerischen Simulation: Preprocessing, Computation, Postprocessing.

Randbedingungen, Belastungen für strukturelle Berechnungen oder Ein- und Ausströmbedingungen für eine strömungsmechanische Untersuchung. Von großer Bedeutung (und in der Regel verbunden mit großem Aufwand) ist dann die Erzeugung eines Berechnungsnetzes oder -gitters. Für diesen Schritt stehen zwar durchaus leistungsfähige Netzgeneratoren zur Verfügung. Trotzdem gehört es zur industriellen Praxis, dass dieser Schritt oftmals mit tage- oder sogar wochenlanger Ingenieurarbeit verbunden ist.

Auf das *Preprocessing* folgt die eigentliche *Computation*-Phase, in der zumeist im *Batch*-Betrieb, also ohne Interaktion mit dem Benutzer die eigentliche Berechnung durchgeführt wird. Für die meisten strukturellen Simulationen im Bauingenieurwesen reicht die Leistung eines handelsüblichen PCs, um die Ergebnisse in Minuten bis wenigen Stunden zu erhalten. Die in der Regel wesentlich aufwändigeren fluidmechanischen Berechnungen verlangen bei vertretbarem Zeitaufwand oft den Einsatz von Rechenclustern, also die parallele Bearbeitung durch mehrere Einzelrechner oder gar die Verwendung von Höchstleistungsrechnern (LRZ<sup>1</sup>, HLRB).

Das *Postprocessing*, also die Auswertung der Daten und die daran gebundene ingenieurgemäße Interpretation der Ergebnisse findet dann wieder interaktiv statt. Technisch-wissenschaftliche Anwendungen können dabei heute von der stürmischen Entwicklung im *Consumer*-Bereich („Spiele-Software“) profitieren. Ohne die dort entstandene Nachfrage wäre die heute auch für Ingenieurapplikationen verfügbare grafische Hard- und Software niemals entwickelt worden.

In aller Regel ist nach der Ergebnisinterpretation eine Modifikation oder Verfeinerung des Entwurfs bzw. die Anpassung von Parameter durchzuführen, so dass der beschriebene Prozess nicht einmal, sondern in mehreren Zyklen zu durchlaufen ist. Auch sind bei industriellen Projekten parallel von mehreren Bearbeitern zum Teil ähnliche oder auch völlig anders gelagerte Simulationen zu bewältigen (*concurrent engineering*, z.B. (PRASAD, 1995; ANUMBA, 2006)) Aus dieser heute üblichen Struktur der Dreiteilung numerischer Simulation in die Phasen *Preprocessing*, *Computation* und *Postprocessing* sowie aus der Nebenläufigkeit des Planungsprozesses folgt unmittelbar ein erhebliches Problem für die oben geschilderte computergestützte Kooperation. Selbst wenn Berechnungsergebnisse in einen zentralen Datenbestand zurückgespeichert werden, droht aufgrund der *langen Transaktionen* zwischen Beginn des *Preprocessings* und Rückspeicherung zum Ende des *Postprocessings* die Inkonsistenz der Daten. Eine sehr aufwändige Synchronisation ist nötig. Auch sind Pre- und Postprozessoren in der Regel so aufgebaut, dass sie zwar die Interaktion mit *einem* Benutzer erlauben, ein verteiltes, netzgestütztes Arbeiten im Team aber nicht unterstützen.

---

<sup>1</sup> <http://www.lrz-muenchen.de/service/compute/hlrb/hardware.html>

An diesen Defiziten setzen Forschungsarbeiten an, die in den letzten Jahren am Lehrstuhl für Bauinformatik der Technischen Universität München durchgeführt wurden. Als gemeinsamer Datenbestand wird ein umfassendes Produktmodell für Bauwerke verwendet, von dem Simulationsmodelle für verschiedene Anwendungsbereiche abgeleitet werden. In (NEUBERG et al., 2002; VAN TREECK et al., 2007; WASSOUF et al., 2006) sind bauphysikalische Anwendungen beschrieben, (ROMBERG et al., 2004) setzen sich mit strukturellen Fragen auseinander und (BORRMANN et al., 2006; BORRMANN, 2007; WENISCH et al., 2007; VAN TREECK et al., 2007; WENISCH, 2008) befassen sich mit interaktiven Systemen zur Strömungssimulation, wobei insbesondere Innenraumströmungen im Vordergrund stehen. Diese Ansätze werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3. Ein Kollaborationsmodell für den ingenieurgerechten Entwurfsprozess

Ausgangspunkt des Kollaborationsmodells ist das so genannten *Computational Steering*, in dem die Trennung der drei Phasen Preprocessing, Computation und Postprocessing überwunden wird. Für komplexe Simulationsaufgaben ist diese Integration nur möglich, wenn die (oftmals aufwändige) Berechnungsphase so schnell durchgeführt werden kann, dass eine Reaktion des *Steering*-Systems quasi in Echtzeit möglich ist. Einige jüngst entwickelte Systeme nutzen als Nutzerschnittstelle *Virtual Reality* Methoden und erreichen dadurch einen besonders hohen Grad an Interaktivität (RANTZLAU & LANG, 1998). Die von uns entwickelte *Collaboration Platform* (Abb. 2) wurde so entworfen, dass sie es mehreren Benutzern erlaubt, gleichzeitig mit dem *Computational Steering* System zu interagieren. Zentral ist der Kollaborationsserver, der die Verwaltung der Nutzer und des geometrisch-numerischen Modells übernimmt, für die verteilte Bearbeitung im Netz verantwortlich ist, Nebenläufigkeitskontrolle gewährleistet und alle Simulations-

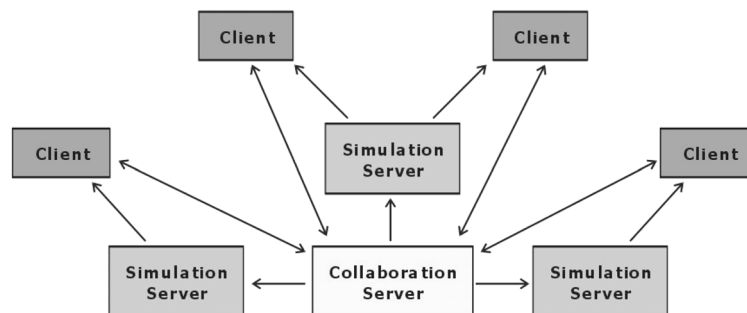


Abb. 2: Collaborative Computational Steering Plattform.

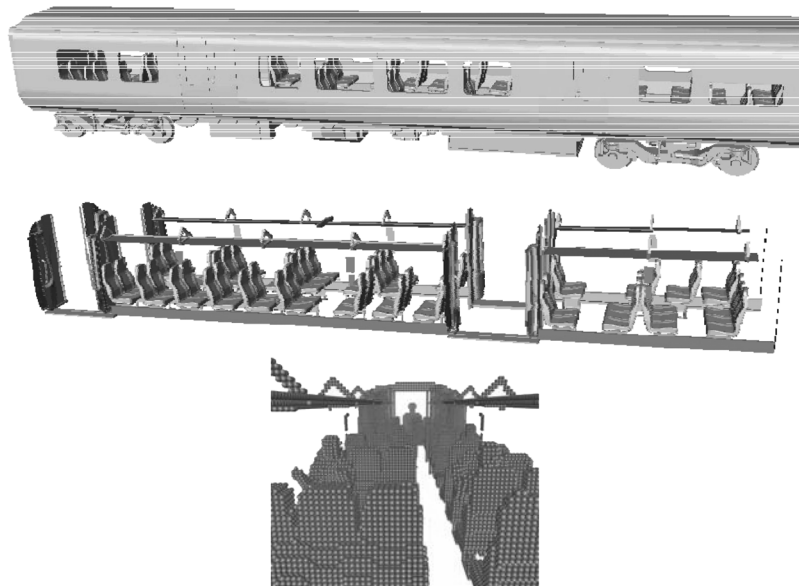


Abb. 3: Diskretisierung eines Wagon-Innenraums. a,b: Außenhaut und Innenstruktur. c: „Voxel“-Modell der Innenstruktur. (Kooperation mit SIEMENS AG, München).

kenngrößen koordiniert. Über diesen Server kann jeder Nutzer Änderungen am Modell vornehmen, die dann quasi in Echtzeit allen anderen Kooperationspartnern über ihre jeweilige Interaktions- bzw. Visualisierungsschnittstellen, den *Clients* sichtbar werden. Neben dem Kollaborationsserver sind die Simulationsserver wesentlich, die auf das gemeinsame Modell zugreifen und unterschiedlichste Simulationaufgaben übernehmen können.

Grundsätzlich können diese von einfachen Massenberechnungen bis zu komplexen struktur- oder strömungsmechanischen Simulationen gehen. Wesentlich ist, dass die Nutzer des Systems verschiedenartige Endgeräte verwenden können und dass damit wie bei den oben diskutierten Office-Systemen große Flexibilität gewährleistet ist. Während als Simulationsserver in der Regel sehr leistungsfähige Hardware bis hin zu Höchstleistungsrechnern eingebunden wird, können als Clients Laptops, Desktop-Computer oder bei Verfügbarkeit auch Spezialhardware mit Virtual-Reality-Fähigkeit genutzt werden. Von zentraler Bedeutung zur Erreichung des Ziels einer interaktiven Simulation ist sowohl das zu verwendende numerische Verfahren als auch die Möglichkeit einer effizienten, sehr schnellen Generierung eines Berechnungsgitters, die möglichst keinerlei Eingriff des Benutzers erfordert und ‚in Echtzeit‘ auf Veränderungen des geometrischen Modells reagieren kann. Als numerischer Kern wurde das

Lattice-Boltzmann-Verfahren (KRAFCZYK, 2001; SUCCI, 2001) verwendet, das sich besonders gut zur Einbindung in den Steering-Rahmen eignet. Ein Grund dafür ist die Verwendung von kartesischen Gittern, die sowohl einer automatischen Generierung als auch einer effizienten Parallelisierung auf Hochleistungsrechnern entgegen kommen. Die Gittergenerierung kann dabei hierarchische Datenstrukturen, so genannte Oktalbäume ausnutzen und mit rekursiven Algorithmen sehr schnell Diskretisierungen erzeugen, die mit herkömmlichen Verfahren tagelange Ingenieurarbeit erfordern würden. Ein Beispiel ist in Abb. 3 dargestellt. Die Diskretisierung des Wagens in einer Auflösung von  $400 \times 50 \times 60$  Zellen wurde auf einem handelsüblichen PC in lediglich 1.5 sec durchgeführt. Aus Darstellungsgründen ist in Abb.3c die Struktur und nicht das für die Simulation eigentlich nötige Luftvolumen des Innenraums abgebildet.

#### 4. Ein Beispielszenario: Klimatisierung eines Operationssaals

Als Beispiel soll die interaktive Strömungssimulation für einen Operationssaal beschrieben werden. Einer optimalen Belüftung kommt in OPs besonders große Bedeutung zu, weil einerseits sichergestellt werden muss, dass die Luftströmung an offenen Wunden jederzeit keimfrei ist, also möglichst vom Auslass bis zum Patienten keine keimbehafteten Gegenstände überstrichen hat, andererseits für das Operationspersonal optimale Arbeitsbedingungen zu gewährleisten sind. Abb. 4 zeigt links den Ausschnitt eines Operationssaals im Klinikum

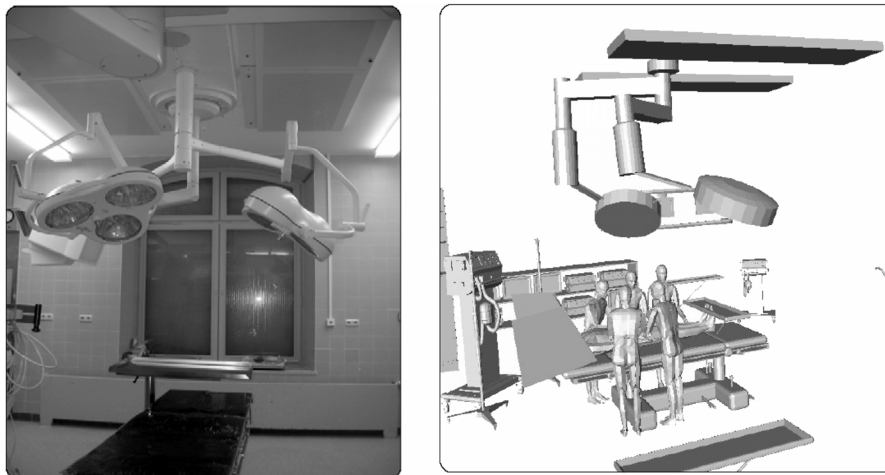


Abb. 4: Operationssaal mit rechteckigen Belüftungsfeldern an der Decke: Foto und Simulationsmodell.



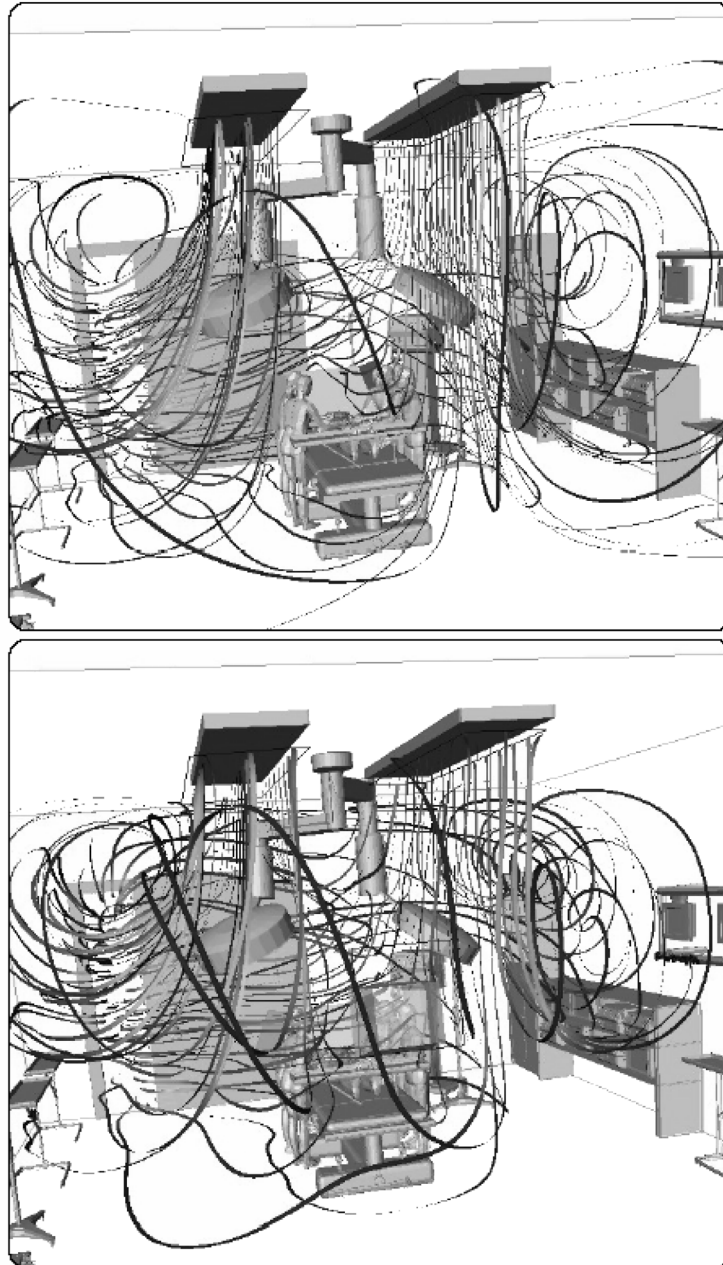


Abb. 5: Strömungsszenarien vor und nach der Anbringung einer zusätzlichen Deckenbelüftung.

rechts der Isar der TUM, rechts das diskretisierte Simulationsmodell mit mehreren Personen und entsprechenden Gerätschaften. An der Decke sind zwei rechteckige Auslässe der Klimatisierung zu erkennen.

In Abb. 5 sind zwei Szenarien der Strömungssimulation dargestellt. Während im oberen Bildteil zu sehen ist, dass die gefilterte Luft von den Operationslampen über dem Operationstisch abgelenkt wird, ist durch die Verbreiterung des Lüftungsauslasses (unterer Bildteil) eine deutliche Verbesserung der Luftströmung erkennbar. Die Veränderung des geometrischen Modells wurde hier während der laufenden Strömungssimulation vorgenommen und erlaubt dem Ingenieur, in sehr kurzer Zeit optimierte Konfigurationen zu entwickeln. Von besonderer Bedeutung für diesen Prozess ist auch die Einbindung von Spezialisten unterschiedlicher Disziplinen in den kooperativen Entwurf. So kann z.B. nur ein mit den Abläufen vertrauter Mediziner die Szenarien und Notwendigkeiten der Positionierung von Geräten während der Operation beurteilen.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

*Collaborative Computational Steering* eröffnet völlig neue Möglichkeiten der Verbindung von numerischer Simulation und internetgestützter Kooperation. Voraussetzung ist eine Softwarestruktur, die in vielerlei Hinsicht von klassischen Ansätzen abweicht, die seit Jahrzehnten Berechnungsverfahren in den Ingenieurwissenschaften prägen. Dies betrifft sowohl eine Überwindung der üblichen Trennung von Preprocessing, Computation und Postprocessing als auch die Notwendigkeit, geometrische Modelle zu Produktmodellen weiter zu entwickeln. Von entscheidender Bedeutung ist schließlich die Wahl geeigneter numerischer Methoden, die sich insbesondere durch große Flexibilität hinsichtlich der Veränderung der verwendeten geometrischen Modelle auszeichnen müssen. In Verbindung mit immer schnellerer und leistungsfähigerer Hardware kann Collaborative Computational Steering zu einem neuen Paradigma im *Virtual Engineering* werden, das den ingenieurgemäßen Entwurfsprozess wesentlich besser unterstützt, als dies mit herkömmlichen Verfahren möglich wäre.

## Literatur

- ALEX, J. (2000): Konrad Zuse: der Vater des Computers. – Parzeller-Verlag, Fulda.
- ANUMBA, C. (2006): Concurrent Engineering in Construction Projects. Routledge.
- BRAZILEVS, Y., B.M CALO, Y. ZHANG & T.J.R. HUGHES (2006): Isogeometric Fluid-Structure Interaction Analysis with Applications to Arterial Blood Flow, Comput. Mech. **38**: 310–322.

- BEUCKE, K., CAPRONO, P. & FIRMENICH, B. (1990): Offene CAD-Konzepte für Lösungen im Bauwesen. *Bauingenieur* **65**: 477–484.
- BORRMANN, A. (2007): Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken. – Dissertation. Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München.
- BORRMANN, A., WENISCH, P., VAN TREECK, C. & RANK, E. (2006): Collaborative Computational Steering: Principles and Application in HVAC Layout. – *Integrated Computer-Aided Engineering* **13**(4) 361–376.
- DÜSTER, A., BRÖKER, H. & RANK, E. (2001): The p-version of the finite element method for three-dimensional curved thin walled structures. – *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, **52**: 673–703.
- KRAFCZYK, M. (2001): Die Gitter-Boltzmann-Methode: Von der Theorie zur Anwendung. – Habilitationsschrift. Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München.
- LACKNER, R., MANG, H.A. PICHLER, CH.: Computational Concrete Mechanics (2004). – In: E. STEIN, E., DE BORST, R., HUGHES, T.J.R. (Hrsg): *Encyclopedia of Computational Mechanics*; John Wiley & Sons: 513–541, Chichester.
- MACRAE, N. (1994): John von Neumann : Mathematik und Computerforschung – Facetten eines Genies. – Birkhäuser-Verlag, Basel.
- MANG, H.A., LACKNER, R., MESCHKE, G. & MOSLER, J. (2003): Computational Modeling of Concrete Structures. – In: R. de Borst, H.A. Mang (Hrsg): *Comprehensive Structural Integrity Vol. III*, Elsevier: 541–605, Oxford.
- MANG, H.A. (1995): Flächentragwerke – In: *Der Ingenieurbau. Rechnerorientierte Bau-mechanik (Band 6)*, Wilhelm Ernst & Sohn: 1–139, Berlin.
- MANG, H. A., EBERHARDSTEINER, J., LACKNER, R., MACKENZIE-HELNWEIN, P., PICHLER, CH. (2003): Constitutive Modeling and Computational Mechanics of Wood and Cement-Based Materials – *Building Research Journal*, **51**(4): 239–269.
- MEIßNER, U., VON MITSCHKE-COLLANDE, P. & NITSCHKE, G. (1992): CAD im Bauwesen. Springer-Verlag, Berlin.
- NEUBERG, F., RANK, E., EKKERLEIN, C. & FAULSTICH, M. (2002): Internetbasierte Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken. – *Bauphysik*, **24**(6): 354–360.
- PRASAD, B. (1995): *Concurrent Engineering Fundamentals: Integrated Product and Process Organization*. Prentice Hall, New York.
- RANK, E., DÜSTER, A., NÜBEL, V., PREUSCH, K. & BRUHNS, O.T. (2005): High order finite elements for shells. – *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **194**: 2494–2512.

- RANK, E., J. PARVIZIAN, Z. YOSIBASH & A. DÜSTER (2007): Towards interactive numerical simulation for patient specific orthopaedic surgery planning. – In: Proc. of the Third Int. Congress on Computational Bioengineering, Isla de Margarita, Venezuela.
- RANTZAU, D. & U. LANG (1998): A scalable virtual environment for large scale scientific data analysis. – *Future Generation Computer Systems* **14**(3-4): 215–222.
- RIFAI, S.M., Z. JOHAN, W.-P. WANG, J.-P. GRISVAL, T.J.R. HUGHES & R. M FERENCZ (1999): Multiphysics simulation of flow-induced vibrations and aeroelasticity on parallel computing platforms. – *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **174**(3-4): 393–417.
- ROMBERG, R., A. NIGGL, C. VAN TREECK & E. RANK (2004): Structural Analysis based on the Product Model Standard IFC. – In: Proc of the Xth Int. on Comp. in Civil and Building Engineering (ICCCBE), Weimar.
- RÜPPEL, U. & U. MEIßNER (1996): Integrierte Planung, Fertigung und Nutzung von Bauwerken auf der Basis von Produktmodellen. – *Bauingenieur* **71**: 47–55.
- SUCCI, S. (2001): *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. – Oxford University Press, Oxford.
- VAN TREECK, C., P. WENISCH, A. BORRMANN, M. PFAFFINGER, O. WENISCH & E. RANK (2007): ComfSim - Interaktive Simulation des thermischen Komforts in Innenräumen auf Höchstleistungsrechnern. – *Bauphysik* **29**(1): 2–7.
- WASSOUF, Z., M. EGGER, F. NEUBERG, C. VAN TREECK & E. RANK (2006): Produktmodellbasierte Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken. – *Bauingenieur*, **81**: 251–258.
- WENISCH, P. (2008): *Computational Steering of CFD Simulations on Teraflop-Supercomputers* – Dissertation. Lehrstuhl für Bauinformatik, Technische Universität München.
- WENISCH, P., C. VAN TREECK, A. BORRMANN, E. RANK & O. WENISCH (2007): Computational Steering on Distributed Systems: Indoor Comfort Simulations as a Case Study of Interactive CFD on Supercomputers. – *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems* **22**(4): 275–291.
- WRIGGERS, P., U. MEIßNER, E. STEIN & W. WUNDERLICH (1998): *Finite Elemente in der Baupraxis*. – Ernst & Sohn, Berlin.
- WRIGGERS, P. (2001): *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. – Springer-Verlag, Berlin.
- ZIENKIEWICZ, O.C. & R. L. TAYLOR (2000): *The Finite Element Method - The Basis*. – Butterworth-Heinemann.
- ZOHDI, T. I. & P. WRIGGERS (2005): *Introduction to Computational Micromechanics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.